

## **DOPTIN: SOFTWARE PARA LA ENSEÑANZA DEL DISEÑO ÓPTIMO BAJO INCERTIDUMBRE**

Ing. Carmen N. Paniagua<sup>1</sup>  
Ing. Omar A. Iglesias<sup>1</sup>

Este software pretende resolver dificultades encontradas dentro de la cátedra Ingeniería de Procesos en la enseñanza del diseño óptimo bajo incertidumbre en el caso de variables continuas, donde la complejidad de la estructura numérica dificulta la comprensión del proceso de cálculo en su totalidad.

En DOptIn, el alumno debe conducir la secuencia de enlace entre el método de optimización, el de integración y el propio orden de cálculo del problema, quedando liberado del complejo y reiterativo procedimiento numérico a que ello da lugar.

Como lenguaje de programación se utilizó DELPHI 1.0 de Borland, utilizando un clásico conjunto de ventanas como interface con el usuario.

El tipo de problema que se resuelve posee variables continuas, con una acción presente definida por una única variable de decisión y una situación futura con un solo parámetro incierto. El método utilizado se basa en optimizar el valor esperado de la función objetivo.

Una vez presentado el problema se pasa a la fase de definición, donde el alumno debe indicar las variables que determinan el problema de diseño óptimo bajo incertidumbre, así como los valores necesarios para efectuar el cálculo. En todos los casos el programa supervisa las indicaciones ingresadas y verifica su corrección.

Al inicio de la fase siguiente, la etapa de cálculo, el alumno se hace cargo de la lógica del mismo, para luego ser reemplazado por el sistema, que simula "aprender" como realizar la integración o la búsqueda del óptimo, evitando la acción tediosa de reiterar un mismo esquema.

---

<sup>1</sup> Laboratorio de Innovación y Transferencia de Tecnología  
Departamento de Ingeniería Química - Facultad de Ingeniería - UNLP

**DOPTIN: SOFTWARE PARA LA ENSEÑANZA DEL DISEÑO OPTIMO BAJO  
INCERTIDUMBRE**

Ing. Carmen N. Paniagua<sup>1</sup>  
Ing. Omar A. Iglesias<sup>1</sup>

**Introducción**

La irrupción de la computadora personal en la sociedad de fines de siglo ha modificado el desenvolvimiento de las distintas actividades que en ella se realizan. La enseñanza, como es obvio, también se ha visto afectada y, en particular, dentro de los ámbitos universitarios el tema ha merecido una atención especial. Un sinnúmero de trabajos así lo atestiguan, en un amplio abanico, que va desde la reflexión sobre los modos convenientes de abordar la cuestión, hasta el establecimiento de sites en Internet donde se pueden realizar actividades académicas, con el uso de software disponible allí mismo (1, 2, 3).

La preparación de este tipo de elementos de apoyo didáctico en la enseñanza universitaria es una de las actuales líneas de trabajo de Laboratorio de Innovación y Transferencia de Tecnología y el presente es el fruto de un desarrollo realizado en ese marco.

El programa DOPTIN está destinado a la enseñanza del diseño optimo bajo incertidumbre en el caso de variables continuas. Con él se apunta a eliminar las dificultades encontradas en la comprensión del tema, donde la complejidad de la estructura numérica dificulta la percepción de los aspectos conceptuales involucrados en la técnica, de acuerdo a la experiencia que se tiene en su dictado dentro de la cátedra de Ingeniería de Procesos.

La estrategia pedagógica adoptada busca que el alumno interactúe con la secuencia lógica del método, evitándole la abrumadora y mecánica actividad del cálculo para centrar su atención en las relaciones existentes entre las variables del sistema y las distintas etapas del procedimiento.

La experiencia realizada en la cátedra con otros software de apoyo a la enseñanza, como el SINRED (4), ha demostrado que este tipo de programas constituye una herramienta fundamental como material didáctico para facilitar el proceso de aprendizaje, por lo que se ha trazado un proyecto de desarrollo para contar con ellos en la totalidad de los temas de la asignatura.

---

<sup>1</sup> Laboratorio de Innovación y Transferencia de Tecnología Departamento de Ingeniería Química - Facultad de Ingeniería - UNLP.

## Influencia de la incertidumbre en el problema del diseño

El diseño de un sistema, cuando la totalidad de los valores de los datos del mismo son perfectamente conocidos, es una búsqueda, dentro de un ámbito de soluciones admisibles, de los niveles más adecuados, de acuerdo a un cierto objetivo, para las variables de decisión - o independientes - que se han determinado para el problema.

Sin embargo, no siempre - en realidad, casi nunca - los datos resultan ser conocidos con certeza. Puede tratarse de información que se ha de verificar en el futuro (un nivel de ventas, por ej.), lo que obviamente, impide su conocimiento cierto en el presente. Otro caso ocurre cuando se trata de relaciones funcionales empíricas o semiempíricas donde, por su origen experimental, resulta imposible determinar con exactitud el valor que ha de tomar una determinada variable.

Las predicciones que se hacen en base a ese tipo de correlaciones conducen a un resultado cierto sólo en términos estadísticos. El valor correcto será conocido cuando el equipo entre en operación, es decir, en una instancia posterior al momento del diseño. Aparece, de este modo, una complejidad adicional en el problema de diseño óptimo: ahora, la función objetivo depende no sólo de las variables de decisión sino de otras, sobre las cuales no se puede ejercer acción alguna:

$$FO = FO(\{V\}, \{p\})$$

donde:  $\{V\}$  es el conjunto de variables de decisión

$\{p\}$  es el conjunto de parámetros inciertos.

Dentro de las variables de decisión es preciso distinguir, como de naturaleza distinta en lo que respecta al análisis, entre aquellas que han de quedar fijas una vez que el sistema esté construido (la geometría del mismo, por ej.) de otras (como una presión o un caudal) que, si bien poseen un valor determinado en el momento del diseño, no existe mayor inconveniente en modificarlas durante la operación del sistema.

El problema del diseño óptimo bajo incertidumbre se plantea con el primer grupo de variables, ya que las mismas deberán quedar definidas antes de poder conocer, con exactitud, el valor de los parámetros inciertos, cosa que sucederá cuando el sistema se encuentre en operación.

Así, por ejemplo, el esquema de proceso para una red de intercambio y las áreas de los equipos deberán estar definidos por el diseñador antes de que el funcionamiento del sistema permita conocer el valor exacto de los coeficientes globales de transferencia de calor.

Si al hecho de otorgar valores a las variables de decisión se lo considera como definir una acción presente A y lo propio para los parámetros inciertos constituye el establecimiento de una situación futura S, puede entenderse con facilidad que, combinando adecuadamente acciones presentes y situaciones futuras, se puede obtener un panorama claro de la influencia de la incertidumbre sobre la función objetivo y obrar en consecuencia.

Si bien para abordar el problema en forma continua bajo incertidumbre, existen distintos métodos, en este programa se adoptó el del criterio del valor esperado, con el que se debe optimizar no la función objetivo planteada para el problema sino la esperanza matemática de la misma, lo que superpone, a la búsqueda del óptimo, para cada una de sus instancias, la integración de la función objetivo (con la consiguiente resolución del sistema de ecuaciones que representa al sistema), sobre la totalidad del conjunto de valores posibles de los parámetros inciertos.

En la figura 1 se esquematiza el procedimiento computacional necesario donde se incorpora una rutina de búsqueda de mínimo y otra de integración numérica. Esta última está a cargo de calcular, para cada valor dado en la búsqueda a la acción presente  $A$ , el valor de  $FO^*(A)$  que constituye el valor esperado de la función objetivo de esa búsqueda.

Aquí deben introducirse los límites de variación de  $A$  y  $S$ , en un caso para restringir el ámbito de búsqueda y en el otro, para dar los límites en que debe efectuarse la integración.

El conjunto de ecuaciones y el cálculo de la función objetivo particular de cada caso se encuentran incorporados en el orden de cálculo de la figura 1. Allí puede verse, además, la relación estrecha entre la rutina de integración y el orden de cálculo ya que la obtención del valor esperado de la función objetivo para cada acción presente -que constituye la salida del procedimiento de integración-, involucra pasar por el orden de cálculo, tantas veces como pasos de integración se hayan definido. Esta es la cuestión que da origen a DOPTIN, pues la complejidad del problema numérico diluye la percepción conceptual del procedimiento.

En el programa se han seleccionado los métodos con un adecuado balance entre su sencillez de programación y su efectividad, con un mayor énfasis en lo primero, habida cuenta de que la precisión de los resultados es, en este caso, un objetivo de segundo orden. Así, para la fase de optimización se ha elegido el Número de Oro y para la de integración el método de los trapecios.

### **Problemas tipo a resolver con DOPTIN**

El caso que se aborda en el programa DOPTIN posee variables continuas, con la acción presente definida por una única variable de decisión y una situación futura en base a un solo parámetro incierto. Como quedó dicho, el método utilizado consiste en optimizar el valor esperado de la función objetivo.

El problema actualmente implementado en el programa se esquematiza en la figura 2 (pantalla de DOPTIN para la presentación del problema), donde debe diseñarse un intercambiador de área  $A$ , que constituye la única variable de decisión del sistema y donde se considera, además, que el coeficiente global de transferencia tiene un cierto grado de error en su predicción, apareciendo así como el único parámetro incierto del problema. En el problema existe una distribución de frecuencias conocida que se encuentra asociada a

dicho coeficiente.

Desde el punto de vista del problema de incertidumbre, las posibles acciones presentes han de quedar definidas por las dimensiones que se fijen para el área de intercambio, mientras que las situaciones futuras lo serán por los diferentes valores que se verifiquen sobre el coeficiente global U.

Los ajustes finales se realizan con medios auxiliares, en equipos preexistentes ya amortizados y con un grado suficiente de sobredimensionamiento que permite alcanzar exactamente las temperaturas de salida especificadas para las corrientes.

El sistema debe ser diseñado de forma tal que la amortización más los gastos en servicios auxiliares sean mínimos.

El área del intercambiador se considera que puede variar entre 13 y 77 m<sup>2</sup> y el coeficiente global de transferencia entre 192.5 y 770 kcal/hm<sup>2</sup> °C, siendo el valor más probable el de 385 kcal/hm<sup>2</sup> °C.

### **Características generales del sistema implementado**

El sistema, desarrollado en DELPHI 1.0 de Borland, presenta un clásico conjunto de ventanas como interface con el usuario.

A través de ellas el alumno debe establecer los valores que requieren los distintos métodos numéricos que operan en DOPTIN para conducir, luego, la secuencia de enlace entre el método de optimización, el de integración y el propio orden de cálculo del problema, quedando liberado del complejo y reiterativo procedimiento numérico a que ello da lugar.

El programa está constituido por 3 partes o fases :

- enunciado,
- definición y
- cálculo.

#### **1.- Enunciado**

Se comienza presentando, en un conjunto de pantallas como la ya mostrada de la figura 2, *el enunciado del problema*, pudiéndose retroceder o avanzar en su lectura, si así se desea.

Aquí se presenta el problema que se va a optimizar (con todos sus datos), la función objetivo propuesta, los límites de variación de la acción presente y de la situación futura y la ley de distribución del parámetro incierto

## 2.- Definición

Se pasa luego a la *fase de definición*. Aparece allí la pantalla que se muestra en la figura 3, donde, mediante el accionamiento de dos botones ( fase de optimización y fase de integración) es posible establecer los valores de distintos parámetros que requieren los métodos numéricos implementados. Existe una pequeña guía que indica, someramente, las acciones a realizar.

La estrategia seguida en este punto pretende que el alumno, a partir de la lectura detenida del enunciado, comprenda qué debe definir para poder resolver un problema de estas características. Este proceso de definición se va realizando, a través de distintas ventanas, en base a un esquema de multiple choice, donde se debe seleccionar la variable que define la acción presente y el parámetro que corresponde a la situación futura, así como sus valores extremos de variación. Esto no se utiliza en el caso del paso de integración y la cota final del método de optimización, en los que el alumno puede entrar un valor dentro de un rango especificado. La variante multiple choice se ha elegido en virtud de la sencillez asociada al análisis y validación de los datos ingresados.

Una vez que el alumno selecciona uno de los dos botones, no importando el orden en que lo hace, comienza a navegar a través de distintos cuadros para poder elegir, entre varias opciones, las variables, funciones o parámetros necesarios para comenzar el cálculo.

Si comienza por especificar la fase de optimización aparece un cuadro con las 3 definiciones que se deben realizar: variable que involucra la acción presente, cota final del método y tipo de función objetivo que posee el problema. Con esta última se pretende, simplemente, remarcarle al alumno el carácter probabilístico que posee la función objetivo en este tipo de problema.

Tanto en el caso de la acción presente como en el de la función objetivo, aparece como ya se dijo, un cuadro de multiple choice como el de la figura 4, en el cual el alumno debe seleccionar la opción correcta.

Al pretender definir la acción presente, en el problema implementado, además de la opción correcta, las otras selecciones posibles que se presentan corresponden, en un caso, a una variable no incluida en el enunciado y, en el otro, al propio parámetro incierto, apuntando, con la primer alternativa, a una lectura cuidadosa del enunciado y en el segundo, a despejar cualquier confusión. En ambos casos aparece, acompañado de una señal sonora, un mensaje que indica la naturaleza del error cometido.

Una vez elegida la variable que define la acción presente se pasa a establecer el intervalo de búsqueda del óptimo. En el problema de demostración en una de las opciones incorrectas el intervalo es mayor que el del enunciado y el mensaje de error indica que el problema podría no estar definido en la totalidad del mismo. En la otra, el intervalo es menor que el del enunciado, con lo que, se advierte, se corre el riesgo de dejar afuera el óptimo.

En el caso de la cota final ya no se tiene multiple choice sino que el alumno debe

ingresar un valor dentro de un rango especificado (figura 5). Si el valor está fuera del rango, aparece un mensaje de error y el ya clásico sonido de advertencia para luego retornar al cuadro de diálogo que solicitaba el dato.

Cuando oprime el botón de definición de la integración se dispara un proceso enteramente análogo al anterior. Así, en el cuadro inicial de la secuencia se procede a indicar que se ha de establecer el parámetro que define la situación futura, el paso de integración o la distribución de frecuencia. El alumno irá navegando, luego, por distintos cuadros con la misma estructura que la explicada para la fase de optimización. En todos los casos las opciones incorrectas están directamente relacionadas con el enunciado, esto es, o lo contradicen o no figuran en él.

En la figura 3 puede advertirse la existencia de una barra de menú con las opciones: Salir, Ayuda y Enunciado.

Con la primera se abandona la ejecución del programa.

La Ayuda es la clásica de todo programa de Windows y en ella el alumno puede encontrar una presentación de las partes constitutivas del programa y de los distintos pasos que deben seguirse para su ejecución.

En la opción Enunciado se reproduce el planteo del problema. A partir de aquí, el enunciado estará siempre disponible, para su consulta, en la barra de menú.

Una vez definidas todas las alternativas a que dan lugar los botones de fases, se habilita el botón de cálculo y se pasa a la etapa siguiente.

### **3.- Cálculo**

En la fase de cálculo, el usuario se hace cargo de supervisar la lógica del proceso, conduciendo la secuencia de enlace entre el método de optimización, el de integración y el propio orden de cálculo del problema. A medida que se sigue la secuencia, van apareciendo gráficos que indican las acciones adoptadas.

Luego de realizar dos pasos en la fase de optimización, el sistema simula "aprender" como supervisar por sí la lógica global del proceso, con lo que se evita al usuario la tediosa acción de reiterar, en exceso, un mismo esquema.

La rutina de optimización comienza calculando un primer valor de la variable de decisión (acción presente). Luego, con este valor, para cada uno de los valores del parámetro incierto, de acuerdo con el paso fijado en la rutina de integración, la ejecución del orden de cálculo permitirá determinar el valor esperado de la función objetivo que corresponde. Posteriormente se repite el procedimiento citado para un segundo valor de la variable de decisión, se procede, luego, a la eliminación de regiones y se continúa, entonces, de acuerdo a la metodología de optimización elegida.

Para que el alumno realice este procedimiento se presentan cinco botones, como puede verse en la figura 6:

- 1.- Dar un valor a la variable de decisión.
- 2.- Calcular la función objetivo en condiciones de certeza.
- 3.- Dar un valor al parámetro incierto.
4. Integrar
- 5.- Calcular los valores de las variables de acuerdo al orden de cálculo.

Cuando el alumno oprima el primer botón, se está introduciendo en el funcionamiento del método de optimización, del mismo modo que cuando indique un valor del parámetro incierto lo está haciendo en la rutina de integración. Como se podrá apreciar, el orden en que se oprimen los botones es importante para la secuencia, por lo tanto, si no se respeta se dan mensajes de error indicando el o los pasos que debería haber realizado previamente.

Cuando indica por primera vez que se debe dar valor a la variable de decisión, aparece un gráfico en el sector inferior derecho de la pantalla con la zona de búsqueda del óptimo resaltada y dicha variable con una marca en el eje correspondiente.

Cuando aprieta el botón que corresponde a "dar valor al parámetro incierto" aparece un nuevo gráfico (superior derecho) donde se irá mostrando el proceso de la integración, luego que complete la secuencia lógica: orden de cálculo, cálculo de la función objetivo e integración.

La integración se va mostrando por partes, es decir, se muestra el área sombreada hasta el valor del parámetro ingresado. Si bien a medida que se sigue el procedimiento los botones dejan de estar activos, en este momento se habilitan todos con excepción al que corresponde a dar valor a la variable de decisión, para que el alumno repita el procedimiento, es decir, oprima nuevamente los botones 2 a 5. Luego de una pausa se muestra la integración completa y el valor esperado de la función objetivo se muestra en el gráfico inferior.

A partir de aquí nuevamente están todos los botones activos y el alumno debe repetir el procedimiento completo para un nuevo valor de la variable de decisión.

En el gráfico inferior se muestran los dos valores de la función objetivo y la zona resultante luego de eliminar una región, propio del número de oro. Posteriormente el alumno es reemplazado por el sistema que simula "aprender" como realizar globalmente la secuencia de cálculo, dando el resultado esperado y evitando aburrir con la reiteración del esquema. El valor mínimo de la función objetivo junto con el valor correspondiente del área aparecen en un cuadro semejante al de la figura anterior.

Si se deseara incorporar al programa otro ejemplo, además de modificar la unit propia del caso, con los datos, el orden de cálculo y el cálculo de la función objetivo en condiciones de certeza, debe modificarse el archivo que contiene los rótulos de los



mensajes de error y de las opciones de las ventanas de multiple choice. Se considera que, dadas las características propias de la programación orientada a objetos de DELPHI, las modificaciones resultarán más sencillas que en otras aplicaciones anteriormente realizadas por los autores.

## Conclusiones

Se ha elaborado un programa, DOPTIN, destinado al apoyo de la enseñanza de los conceptos básicos del diseño óptimo bajo incertidumbre. El mismo forma parte del proyecto de desarrollo de software educativo que se ha planteado el Laboratorio de Innovación y Transferencia de Tecnología.

Dicho programa se encuentra, en este momento, en período de evaluación por parte de los usuarios del mismo, para lo que se aplica una metodología, en cuyo desarrollo han participado los autores del presente trabajo (5).

Si bien las prestaciones del sistema pueden considerarse satisfactorias, de la experiencia de casos anteriores, debe esperarse que se requieran efectuar algunas modificaciones. La naturaleza y extensión de las mismas han de quedar manifiestas después de llevar a cabo el estudio estadístico de las evaluaciones realizadas por los alumnos.

Se entiende que la elaboración de las nuevas versiones ha de resultar un proceso más sencillo de realizar por las características del entorno de programación adoptado.

## Bibliografía

- 1.- Smetana "Using the computer for enhanced the learning of engineering concepts: some examples". CAEE vol.1, nº4, (1994).
- 2.- Cooper, Velazquez "Controller design made easy with Digest version 3". CACHE News nº 43 (1996).
- 3.- Fogler, Piana "Development of an undergraduate course Web site". CACHE News nº42 (1996).
- 4.- Iglesias O. A., "SINRED: un sistema para la enseñanza en síntesis de proceso". 3er. Congreso Interamericano, CAIP'96, Villa María, (1996).

5.- Iglesias O. A., Paniagua C. N., Pessacq R. A.: "The evaluation of university educational software". Aprobado para su publicación en Computer Applications in Engineering Education, USA, (1997).

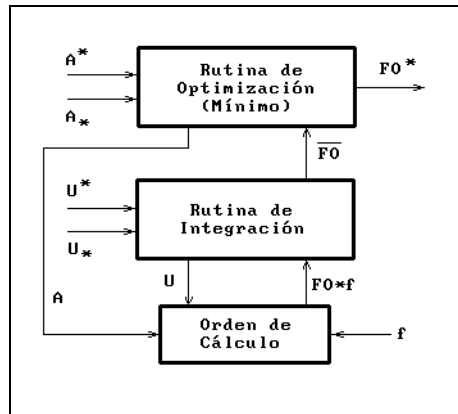


Figura1

Enunciado del Problema

En la figura se muestra el esquema adoptado para calentar una corriente con  $WC_p=2560 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$  desde una temperatura de ingreso al sistema de  $30^\circ\text{C}$  hasta una salida de  $80^\circ\text{C}$ , a la vez que se enfría otra con  $WC_p=3420 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$ , desde  $70^\circ\text{C}$  hasta  $40^\circ\text{C}$ .

Los ajustes finales se realizan con medios auxiliares, aportando  $Q_c \text{ kcal/h}$  y retirando  $Q_f \text{ kcal/h}$ , en equipos preexistentes ya amortizados y con un grado suficiente de sobredimensionamiento que permite alcanzar exactamente las temperaturas de salida especificadas para las corrientes.

The diagram shows a horizontal flow of two streams. The top stream (blue) enters at  $80^\circ\text{C}$  with flow rate  $W_c=2560$  and exits at  $30^\circ\text{C}$ . The bottom stream (black) enters at  $70^\circ\text{C}$  with flow rate  $W_c=3420$  and exits at  $40^\circ\text{C}$ . A central unit labeled 'A,U' is connected to both streams. Auxiliary heating  $Q_c$  is added to the top stream, and auxiliary cooling  $Q_f$  is removed from the bottom stream. The streams are labeled  $T_1$  and  $T_2$  at the central unit.

Retroceder

Continuar...

Figura 1

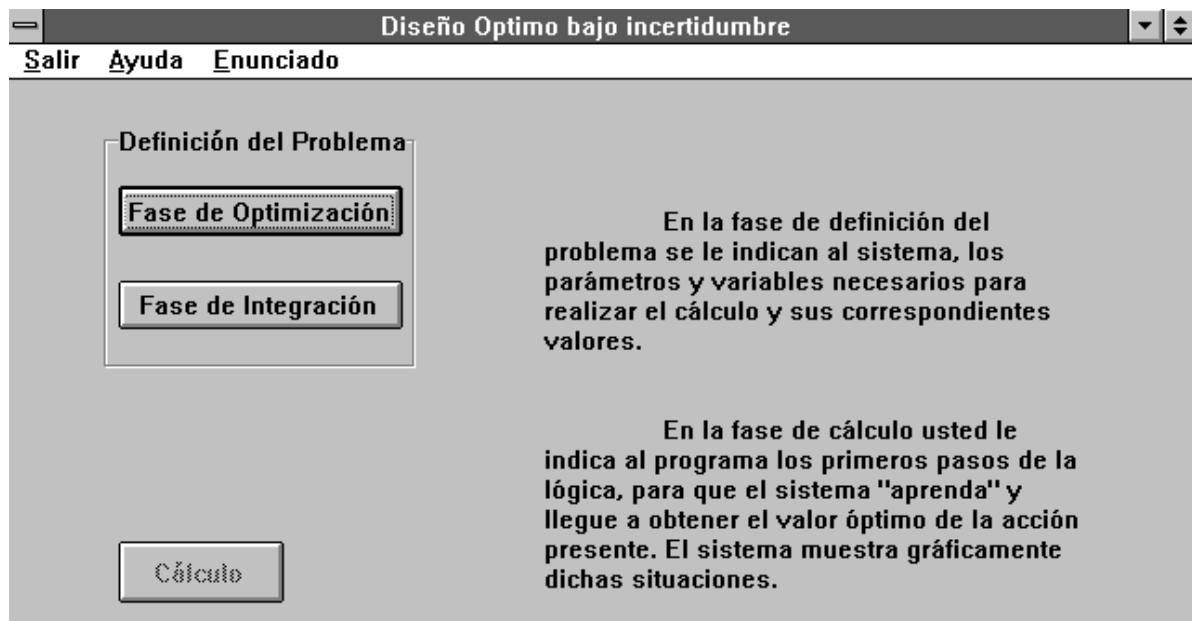


Figura 2

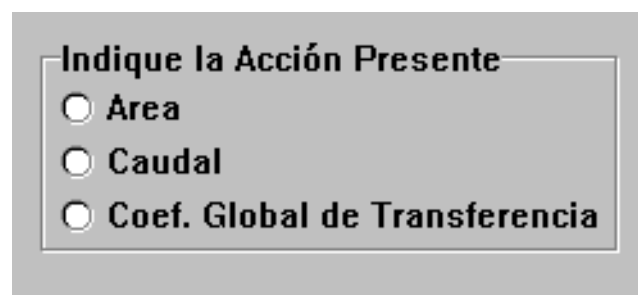


Figura 3

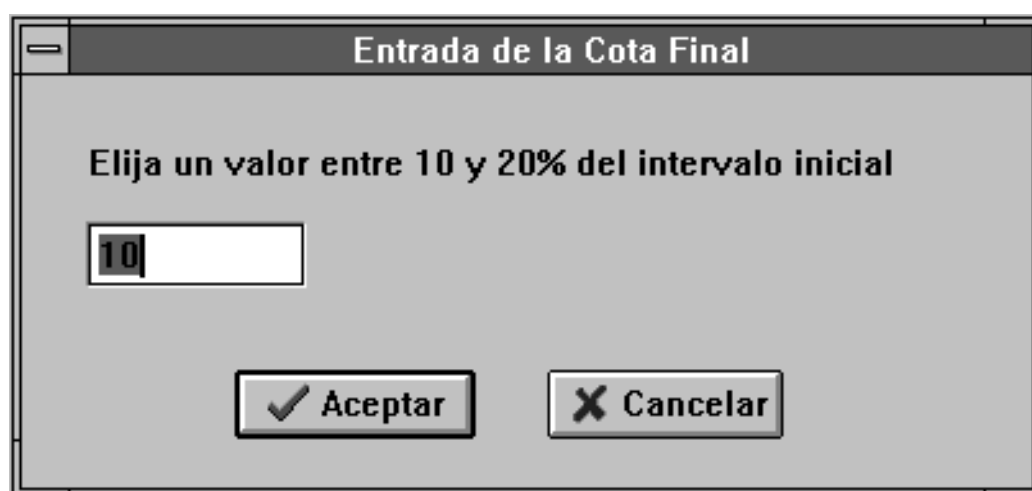


Figura 4

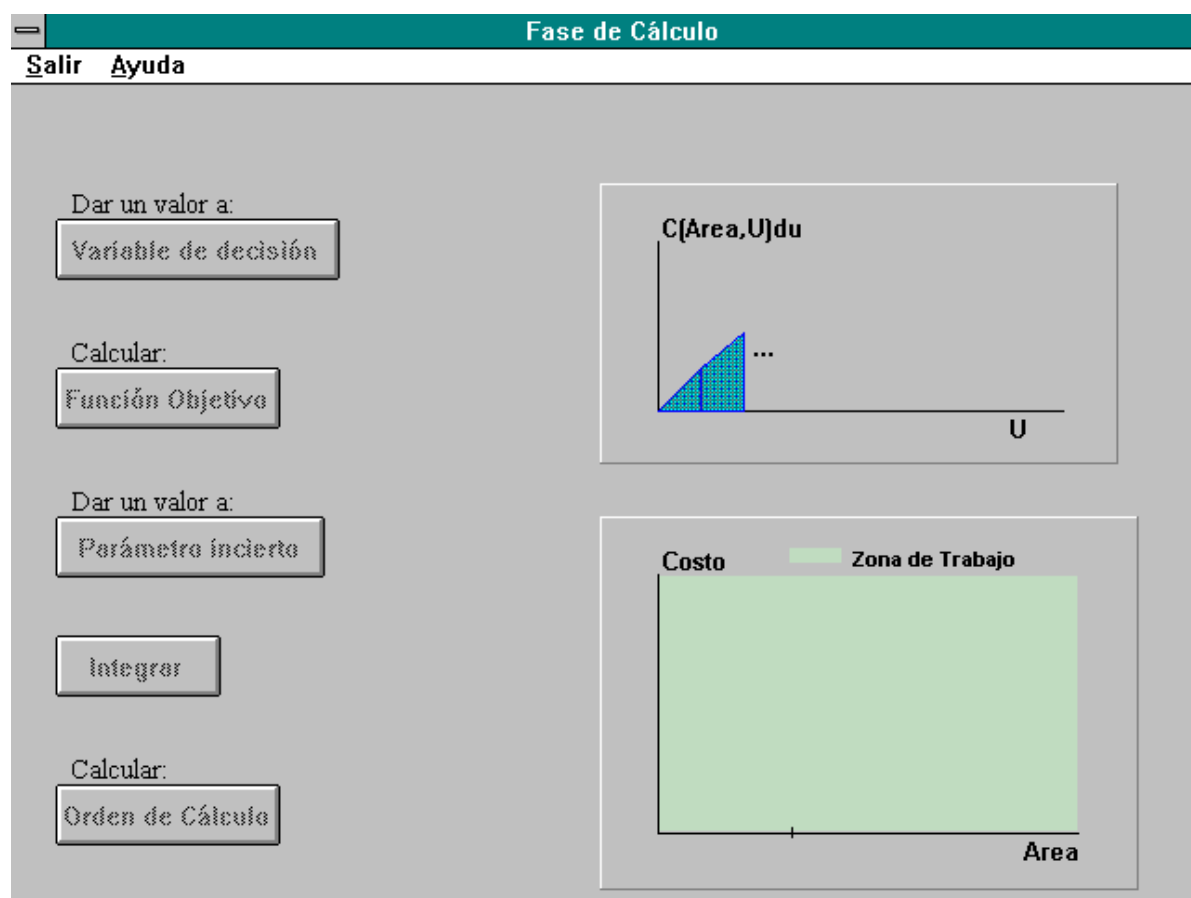


Figura 5